

# 拉萨市不同季节空气微生物浓度及影响因素分析

吴文杰<sup>1,2</sup>, 毛冠男<sup>1</sup>, 齐静<sup>3,4</sup>, 刘勇勤<sup>\*1,3,4</sup>

1 中国科学院青藏高原研究所 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 兰州大学泛第三极环境中心, 甘肃 兰州 730000

4 兰州大学生态学院, 甘肃 兰州 730000

吴文杰, 毛冠男, 齐静, 刘勇勤. 拉萨市不同季节空气微生物浓度及影响因素分析[J]. 微生物学通报, 2023, 50(3): 954-968.

WU Wenjie, MAO Guannan, QI Jing, LIU Yongqin. Seasonal concentrations and influencing factors of airborne microbes in Lhasa of China[J]. Microbiology China, 2023, 50(3): 954-968.

**摘要:**【背景】空气微生物是城市生态系统的重要组成部分, 其浓度对于监测城市空气质量、治理环境污染、预防疾病发生具有重要意义。【目的】研究拉萨市空气微生物分布特征, 探讨气象因素和空气颗粒物对空气微生物分布特征的影响。【方法】基于荧光显微镜法分析了2019年10月–2020年10月不同季节空气微生物浓度及附着特征, 结合气象因素和环境指标分析其影响因素。【结果】在荧光显微镜下, 经过SYBR Green I染色的微生物呈亮绿色, 规则椭圆状, 大小在0.5–1.0 μm之间, 同时还观察到微生物附着在有机物和黑碳上的现象。拉萨市空气微生物浓度变化范围为 $3.10 \times 10^3$ – $2.38 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>, 冬季空气中2种存在形式的微生物(自由漂浮和附着颗粒物)浓度最高。自由漂浮微生物浓度在秋季最低, 与冬季存在显著差异( $P < 0.05$ ), 不同季节颗粒附着微生物的浓度差异不显著。Spearman相关性分析表明, 微生物浓度与气象因素无显著相关, 但与空气中颗粒物浓度呈显著正相关( $P < 0.05$ )。【结论】拉萨市空气微生物浓度与全国其他城市相比处于较低水平, 而且受空气污染物的影响。

**关键词:** 空气微生物; 滤膜采样; 荧光显微镜; 浓度特征; 影响因素

资助项目: 国家自然科学基金(42101128); 中国博士后科学基金资助项目(2022T150670, 2021M693254)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42101128) and the China Postdoctoral Science Foundation (2022T150670, 2021M693254).

\*Corresponding author. E-mail: yqliu@itpcas.ac.cn

Received: 2022-06-24; Accepted: 2022-08-13; Published online: 2022-10-08

## Seasonal concentrations and influencing factors of airborne microbes in Lhasa of China

WU Wenjie<sup>1,2</sup>, MAO Guannan<sup>1</sup>, QI Jing<sup>3,4</sup>, LIU Yongqin<sup>\*1,3,4</sup>

1 State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources (TPESER), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Center for the Pan-third Pole Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China

4 College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China

**Abstract:** [Background] Airborne microbes are a key component of the urban ecosystem, the concentration of which has great significance for monitoring urban air quality, controlling environmental pollution, and preventing disease. [Objective] To analyze the distribution characteristics of airborne microbes in Lhasa of China and explore the effects of meteorological factors and air particulate matter on the distribution of airborne microbes. [Methods] The airborne microbes were stained by SYBR Green I and observed under an epifluorescence microscope. The seasonal concentrations of the microbes from October 2019 to October 2020 were determined. Furthermore, the correlations of the concentration of airborne microbes with meteorological factors and environmental indicators were studied. [Results] The airborne microbes appeared bright green, oval, with a diameter of 0.5–1.0  $\mu\text{m}$  and attaching to the organic matter and black carbon. The concentrations of total microbes in Lhasa ranged from  $3.10 \times 10^3$  to  $2.38 \times 10^4$  cells/ $\text{m}^3$ . The concentrations of airborne microbes in two forms (free-floating and particle-attached) were the highest in winter. The concentration of free-floating microbes was the lowest in autumn, which was significantly different from that in winter ( $P < 0.05$ ). The concentration of particle-attached microbes showed no significant difference among four seasons. Furthermore, the concentration of airborne microbes was not significantly correlated with meteorological factors, while it had a significant positive correlation with the concentration of air particulate matter ( $P < 0.05$ ). [Conclusion] The concentration of airborne microbes in Lhasa was at a low level compared with that in other cities and affected by air pollutants.

**Keywords:** airborne microbe; filter membrane sampling; fluorescence microscopy; concentration characteristics; influencing factors

生物气溶胶是指含有微生物或生物大分子等生命活性物质的气溶胶, 包括空气中的细菌、真菌、病毒、尘螨、花粉、孢子和动植物碎裂解体等<sup>[1]</sup>, 其中细菌、真菌等微生物是生物气溶胶的主要成分<sup>[2]</sup>。空气微生物体积较小, 通常在亚微米范围内<sup>[2]</sup>, 可在大气中停留数小时至 1 周不等<sup>[3]</sup>。当漂浮在空气中的微生物附着在其他颗

粒上时可随附着颗粒运动, 并随其一起沉降<sup>[4]</sup>。

空气微生物的研究多集中在空气微生物的来源、群落组成、浓度和影响空气微生物的各种因素。空气微生物的来源主要包括自然排放和人类活动<sup>[5]</sup>, 其中自然源主要包括土壤、水体表面和动植物腐烂物等, 也有研究<sup>[6]</sup>表明人类的各种生产活动也是空气微生物的重要来源。空气微生物

物的群落组成具有地区和时间差异特征。方治国等<sup>[7]</sup>对北京市夏季空气微生物研究发现,革兰氏阳性菌约占总菌数的70%–85%,显著多于革兰氏阴性菌;夏晓敏等<sup>[8]</sup>发现厦门市空气微生物的主要细菌类群为厚壁菌门、 $\alpha$ -变形菌门和 $\gamma$ -变形菌门;也有研究发现,在沙尘运动期间,空气微生物的优势门为放线菌门、拟杆菌门和变形菌门<sup>[9]</sup>。空气微生物的浓度特征也具有时空差异,埃及空气中细菌的平均浓度为 $1.414 \times 10^3$  CFU/m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>;北京市室外空气中细菌的平均浓度为447.100 CFU/m<sup>3</sup>,并呈春季>冬季>秋季的特征<sup>[11]</sup>;法国萨克雷地区的空气微生物浓度在春季最高,在冬季最低<sup>[12]</sup>;深圳市空气微生物浓度呈现季节变化且夏季>春季>冬季>秋季<sup>[13]</sup>。空气微生物的群落组成和浓度会受到温度、湿度、风速、风向、辐射强度等环境气象因素的影响,研究发现环境气象因素变化会导致空气微生物群落组成变化<sup>[14-15]</sup>,低温有利于青霉菌属和枝顶孢属真菌的生长<sup>[16]</sup>,高湿可以提高空气微生物中古菌的多样性<sup>[17]</sup>,Jo等<sup>[18]</sup>的研究表明温度和相对湿度对空气微生物的生长至关重要;空气微生物通过风力传播,其浓度受风速和风向的共同影响<sup>[19]</sup>;太阳辐射对空气微生物的影响较为复杂,较强的太阳辐射对微生物有损害作用<sup>[20-21]</sup>,而也有研究表明,太阳辐射对一些空气真菌的生长和繁殖可以起到促进作用<sup>[22]</sup>。

空气微生物的检测浓度与收集和检测方法密切相关<sup>[23]</sup>。空气微生物的收集方法通常有固体撞击法<sup>[24]</sup>、液体冲击法<sup>[25]</sup>和过滤法<sup>[26]</sup>,过滤法与其他方法相比操作简单成本较低,对于计数和检测要求较低,同时也可以针对分析内容对生物气溶胶进行分层采样。但在高污染地区进行采样时需注意过滤膜的承载量。检测方法分为培养法和非培养法两大类,其中非培养法包括荧光显微镜法<sup>[27]</sup>、聚合酶链式反应技术<sup>[28]</sup>和流式细胞仪技术<sup>[29]</sup>等。荧光显微镜法因其操

作成本低是鉴定空气微生物的常用方法。研究者在北京<sup>[30]</sup>、西安<sup>[31-32]</sup>、青岛<sup>[33]</sup>、新乡<sup>[34]</sup>等地用荧光显微镜法对当地空气微生物浓度进行了检测,发现这些地区的空气微生物浓度较高,都在 $10^5$  cells/m<sup>3</sup>以上。然而,目前对我国西部地区的空气微生物仍缺乏系统和深入的研究。

青藏高原地区具有强烈的地区特征,处于气候变化的敏感带和脆弱带,一些轻微的气溶胶污染都可能造成严重的影响<sup>[35-36]</sup>。青藏高原地区存在着大量的境外气溶胶污染源<sup>[36]</sup>,例如南亚的黑碳气溶胶污染源、南亚和蒙古地区的沙尘源。采用自然沉降法对拉萨市冬季室外空气微生物的研究<sup>[37]</sup>发现,商业区空气微生物总丰度明显高于文教区;对拉萨市秋季空气微生物多样性的研究发现芽孢杆菌属是其优势菌属<sup>[38]</sup>,通过比较拉萨市、兰州市和珠穆朗玛峰的空气微生物浓度发现,拉萨市的空气微生物浓度介于两者之间<sup>[39]</sup>。目前尚无在年际时间尺度上研究拉萨市空气微生物浓度特征的研究报道。

本研究通过分析拉萨市空气微生物的全年浓度数据,探究拉萨市不同季节的浓度特征及影响因素,并与不同城市的空气微生物浓度进行比较分析,探究人类活动和气象因素等对空气微生物浓度的影响,以期对监测拉萨市空气质量及研究高原地区空气微生物提供重要依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

在中国科学院青藏高原研究所拉萨部(29.65°N, 91.03°E)从2019年10月–2020年10月使用便携式生物气溶胶采样器进行了为期1年的样品采集。样品每周采集1次,每次持续72 h,从上午9点开始,至第4天上午9点结束,共采集了39个样品,其中春季12个、夏季15个、秋季8个、冬季4个。样品信息如表1所示。采样点信息如图1所示。

表 1 样品信息表

Table 1 List of the sample information

样品 Sample	开始时间 Start time	结束时间 Stop time	采样时长 Sampling time (min)	流量 Flow (L/min)	所属季节 Season
LS1	2019-10-7	2019-10-13	8 564	2.75	Autumn
LS2	2019-10-17	2019-10-20	4 843	2.00	Autumn
LS3	2019-11-3	2019-11-6	4 320	2.50	Autumn
LS4	2019-11-10	2019-11-13	4 320	2.50	Autumn
LS5	2019-11-17	2019-11-20	4 320	2.50	Autumn
LS6	2019-11-27	2019-11-30	4 320	2.50	Autumn
LS7	2019-12-1	2019-12-4	4 320	2.50	Winter
LS8	2019-12-8	2019-12-11	4 320	2.50	Winter
LS9	2019-12-15	2019-12-18	4 320	2.50	Winter
LS10	2019-12-23	2019-12-26	4 320	2.50	Winter
LS11	2020-03-8	2020-03-11	4 320	2.50	Spring
LS12	2020-03-15	2020-03-18	4 320	2.50	Spring
LS13	2020-03-22	2020-03-25	4 320	2.50	Spring
LS14	2020-03-29	2020-04-1	4 320	2.50	Spring
LS15	2020-04-5	2020-04-8	4 320	2.50	Spring
LS16	2020-04-12	2020-04-15	4 320	2.50	Spring
LS17	2020-04-19	2020-04-22	4 320	2.50	Spring
LS18	2020-04-26	2020-04-29	4 320	2.50	Spring
LS19	2020-05-3	2020-05-6	4 320	2.50	Spring
LS20	2020-05-10	2020-05-13	4 320	2.50	Spring
LS21	2020-05-15	2020-05-18	4 320	2.50	Spring
LS22	2020-05-25	2020-05-28	4 320	2.50	Spring
LS23	2020-06-1	2020-06-4	4 320	2.50	Summer
LS24	2020-06-5	2020-06-9	4 320	2.50	Summer
LS25	2020-06-8	2020-06-11	4 320	2.50	Summer
LS26	2020-06-14	2020-06-17	4 320	2.50	Summer
LS27	2020-06-21	2020-06-24	4 320	2.50	Summer
LS28	2020-06-28	2020-07-1	4 320	2.50	Summer
LS29	2020-07-12	2020-07-15	4 320	2.50	Summer
LS30	2020-07-19	2020-07-22	4 320	2.50	Summer
LS31	2020-07-26	2020-07-29	4 320	2.50	Summer
LS32	2020-08-2	2020-08-5	4 320	2.50	Summer
LS33	2020-08-9	2020-08-12	4 320	2.50	Summer
LS34	2020-08-17	2020-08-20	4 320	2.50	Summer
LS35	2020-08-20	2020-08-23	4 320	2.50	Summer
LS36	2020-08-23	2020-08-26	4 320	2.50	Summer
LS37	2020-08-30	2020-09-2	4 320	2.50	Summer
LS38	2020-09-24	2020-09-27	4 320	2.50	Autumn
LS39	2020-10-7	2020-10-10	4 320	2.50	Autumn

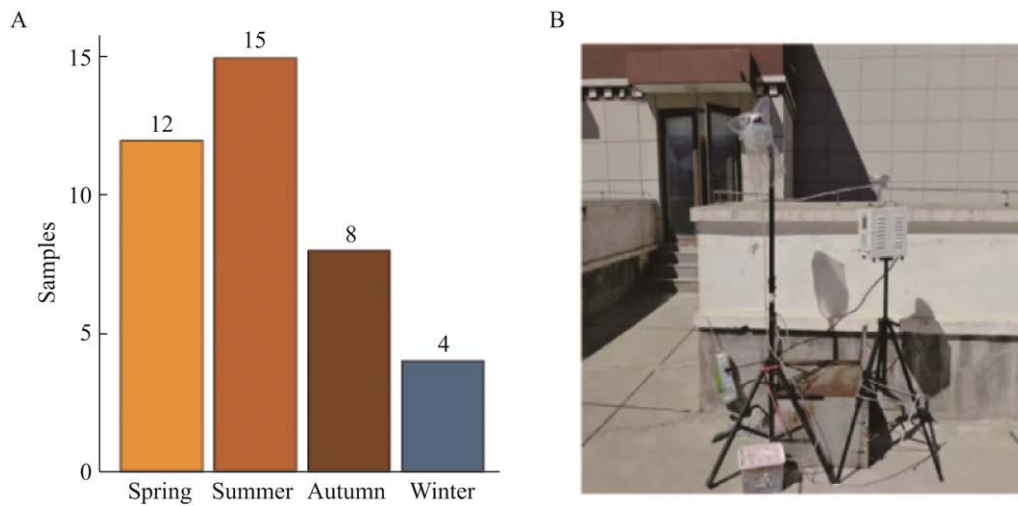


图 1 样品信息(A)及采样器(B)

Figure 1 Sample information (A) and sampler (B).

生物气溶胶样品的收集使用 2 个孔径为  $0.2\ \mu\text{m}$  的聚碳酸酯过滤器, 无菌的  $13\ \text{mm}$  过滤器支架连接一个气泵, 每个过滤器的流量约为  $2.5\ \text{L}/\text{min}$ 。采样前, 所有过滤器都用  $1 \times 10^5\ \text{Pa}$  高压灭菌  $20\ \text{min}$ 。取样后, 样品保存在  $-80\ ^\circ\text{C}$ , 直到下游分析进行。

为了避免污染, 每天用  $75\%$ 乙醇处理采样过滤器支架和用来更换过滤器的材料, 并在操作过程中佩戴口罩。气象数据(气温、相对湿度和风速)和环境指标( $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ )从数据中心 (<http://www.epmap.org/>)下载。

## 1.2 主要试剂和仪器

SYBR Green I 核酸染料( $10\ 000\times$ ), 北京索莱宝科技有限公司; 对苯二胺, 天津市凯通化学试剂有限公司。聚碳酸酯过滤器, Whatman 公司; 过滤器支架, MilliPore 公司; 气泵, ASONE 亚速旺公司; 荧光显微镜, Leica 公司。

## 1.3 生物气溶胶的荧光显微镜分析

空气膜样本被带回实验室后进行荧光显微镜分析。使用  $2.5\times$  的 SYBR Green I 染液将样品

在黑暗、室温条件下染色  $15\ \text{min}$ , 染色完成后将滤膜放在载玻片上, 滤膜上加上荧光保护剂 ( $0.1\%$ 对苯二胺,  $50\%$ 甘油,  $50\%$  PBS)防止荧光淬灭<sup>[40]</sup>。使用荧光显微镜在  $485\ \text{nm}$  蓝色激发光下观察和计数。荧光粒子有 3 种不同的颜色: 绿、黄、黑。随机选择 20 个区域计算空气微生物的浓度。样品中荧光粒子浓度的计算公式<sup>[9]</sup>为:

$$C = \frac{S_1 \times N_0}{S_0 \times V}$$

式中:  $C$  为荧光颗粒的浓度( $\text{particles}/\text{m}^3$ );  $S_1$  为采样膜上的过滤面积( $7 \times 10^7\ \mu\text{m}^2$ );  $S_0$  为显微镜场镜面积( $1.17 \times 10^4\ \mu\text{m}^2$ );  $N_0$  为显微镜下荧光粒子的平均数目;  $V$  为过滤空气的体积。

## 1.4 数据处理

使用 R 对数据进行统计分析, 在 r 3.6.1 中使用“vegan”和“ggplot2”软件包分析微生物浓度和影响因素之间的关联。基于 Spearman 相关性分析微生物浓度与气象因素和人类活动之间的统计学相关性。所有图形均使用 RStudio 生成。

## 2 结果与分析

### 2.1 空气微生物及其他颗粒物的形态特征

样品经 SYBR Green I 染色后, 在荧光显微镜下观察到了 3 种不同颜色, 分别是绿色、黑色和黄色。由于 SYBR Green I 可以与核酸相结合, 所以空气微生物经 SYBR Green I 染色后呈现亮绿色规则椭圆状, 小于  $1\ \mu\text{m}^{[41]}$  (图 2A 中蓝色框圈定的绿色椭圆状), 黑碳和有机物不能和 SYBR Green I 结合, 在荧光显微镜下呈现它们本来的颜色: 黑色(图 2A 中红色框内黑色不规则状)和黄色(图 2B 中红色框内黄色不规则状)。同时, 在显微镜观察过程中还发现了如图 2C 所示的微生物附着在黑碳上的现象, 以及图 2D 所示的微生物附着在有机物上的现象。

### 2.2 空气微生物及颗粒物的浓度特征

微生物、黑碳和有机物的浓度在不同月份的结果表明, 微生物和黑碳的浓度在 12 月份最高, 分别为  $2.38 \times 10^4\ \text{cells}/\text{m}^3$  和  $4.28 \times 10^4\ \text{particles}/\text{m}^3$ , 而有机物的浓度在 4 月份最高, 为  $2.33 \times 10^4\ \text{particles}/\text{m}^3$  (图 3A)。微生物、黑碳和有机物浓度的季节变化如图 3B 所示, 从图 3B 中可以看出微生物浓度在冬季最高( $2.38 \times 10^4\ \text{cells}/\text{m}^3$ )、秋季最低( $7.8 \times 10^3\ \text{cells}/\text{m}^3$ ), 同时显著性差异分析结果表明, 微生物浓度在四季无显著性差异; 有机物浓度在春季较高( $1.82 \times 10^4\ \text{particles}/\text{m}^3$ ), 且春季与夏季之间具有显著性差异, 其他季节之间都无显著性差异; 黑碳浓度在冬季最高( $4.28 \times 10^4\ \text{particles}/\text{m}^3$ ), 与春季和秋季无显著性差异, 但与夏季之间具有显著性差异。

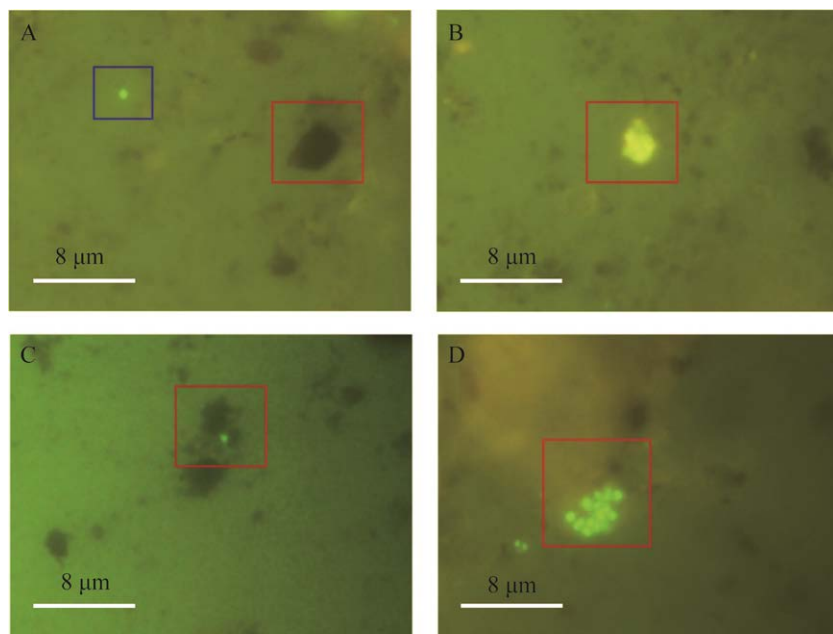


图 2 空气微生物及颗粒物的荧光显微照片 A: 自由漂浮微生物、黑碳. B: 有机物. C: 附着于黑碳上微生物. D: 附着于有机物上微生物

Figure 2 Epifluorescence micrograph of airborne microorganisms and particulate matter. A: Free-floating microbe, black carbon (black particles). B: Organic matter (yellow particles). C: Black carbon-attached microbe. D: Organic matter-attached microbe.

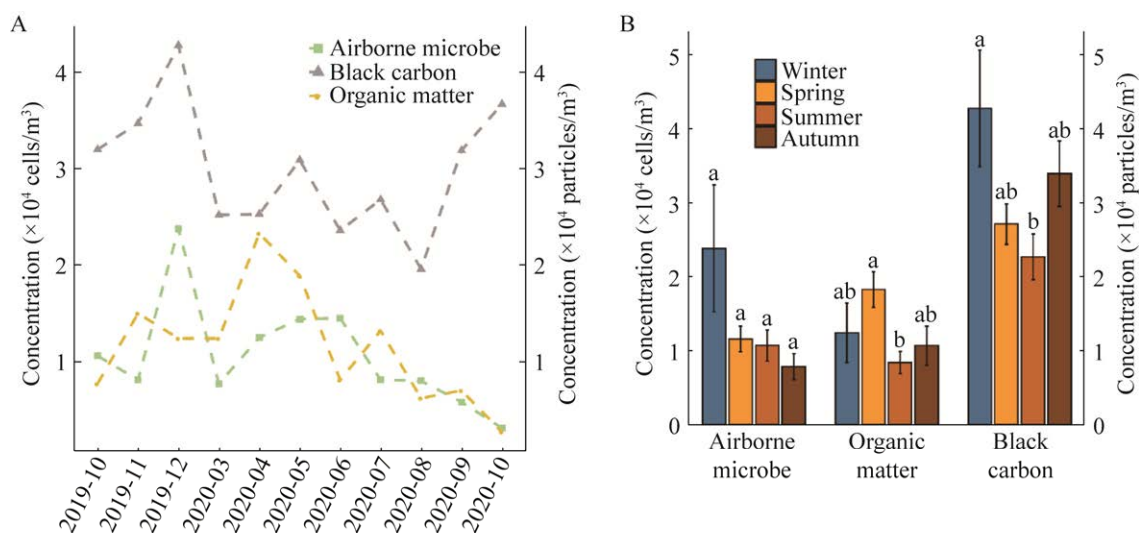


图3 空气微生物及颗粒物的月浓度(A)和季节浓度(B)变化

Figure 3 Concentration changes of airborne microbes and particles in different months (A) and seasons (B).

### 2.3 不同存在形式空气微生物浓度特征

本研究在显微镜计数过程中发现有单个存在的微生物,也有附着于颗粒物上的微生物,附着于颗粒物上的微生物根据其附着物的不同又可分为附着于有机物上微生物和附着于黑碳上微生物,因此空气中微生物共有3种存在形式:自由漂浮微生物、附着于有机物上微生物和附着于黑碳上微生物。在这3种存在形式的微生物中,附着于有机物上的微生物占比最多(57.2%),其次是自由漂浮微生物(35%),附着于黑碳上的微生物(7.8%)占比最少(图4A)。

分别将不同存在形式的微生物计数后比较发现,自由漂浮的微生物与附着于颗粒上的微生物浓度具有相似的月份变化趋势(图4B),在2019年12月份浓度达到最高,在2020年的3、4、5月逐渐增加,在之后的月份呈现减少的趋势,且附着于颗粒上的微生物浓度显著高于自由漂浮微生物浓度。附着于有机物上微生物的浓度变化范围为 $2 \times 10^2$ – $1.36 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>,在2019年12月达到最大值,在2020年5月达到另一个高值后呈现逐渐减少的趋势;自由漂浮微

生物的浓度变化范围为 $1.9 \times 10^3$ – $7.2 \times 10^3$  cells/m<sup>3</sup>,最大值也出现在2019年12月,同时在2020年的3–6月呈现增加的趋势,在之后的月份呈波动下降。附着于黑碳上微生物的浓度在经历了2019年末的增长后,2020年维持在一个较低的水平,无明显波动。

从季节分布来看(图4C),自由漂浮微生物浓度在冬季最高( $7.22 \times 10^3$  cells/m<sup>3</sup>),其次是春季和夏季,秋季最低,显著性差异分析结果显示,自由漂浮微生物浓度在四季无显著性差异;附着于有机物上微生物浓度在冬季最高( $1.36 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>),其次是春、夏、秋季,四季无显著性差异;附着于黑碳上微生物的浓度在冬季最高( $2.93 \times 10^3$  cells/m<sup>3</sup>),四季无显著性差异。

### 2.4 微生物浓度的影响因素

#### 2.4.1 微生物浓度与气象因素的关系

采样期间的气温在–8–21 °C之间变化,平均气温为10.3 °C;相对湿度范围在6%–82%之间,平均相对湿度为44.86%;平均风速为2.3 m/s,且风速在9、10月内有较大波动。

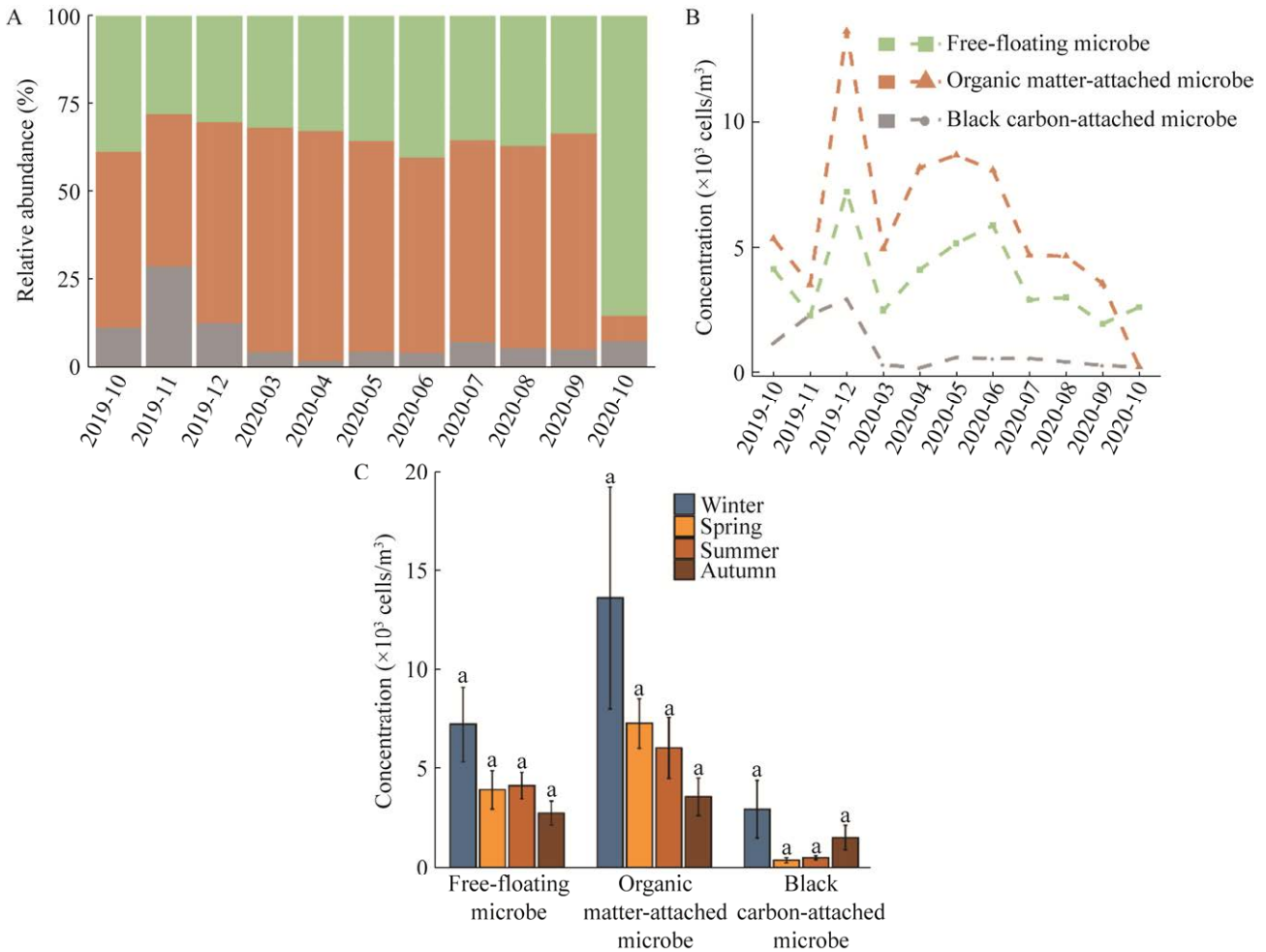


图 4 不同存在形式微生物浓度特征 A: 不同存在形式微生物所占比例. B: 不同存在形式微生物浓度月份变化. C: 不同存在形式微生物浓度季节变化

Figure 4 Concentration characteristics of airborne microbes in different forms. A: Relative abundance ratio. B: Monthly concentration changes. C: Seasonal concentration changes.

将气象因素信息与不同存在形式微生物的浓度信息进行相关性分析,从图 5 中可以看出,不同存在形式的空气微生物浓度与气温、相对湿度、风速等气象因素无显著相关。

#### 2.4.2 微生物浓度与人类活动的关系

本研究将样品中观察到的有机物和黑碳作为人类活动影响的结果,同时收集采样期间的 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度数据,与微生物浓度信息综合分析(图 6)。从图 6 可以看出,自由漂浮微生物的浓度与有机物浓度等人类活动影响因

素无显著相关,结合之前与气象因素的关系来看,自由漂浮微生物不受气象因素和人类活动的影响。

附着于颗粒上的微生物浓度则与颗粒物浓度有显著性相关,附着于有机物上的微生物浓度与有机物和黑碳的浓度有显著性相关,附着于黑碳上的微生物浓度与黑碳、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的浓度有显著相关。然而这些颗粒物大多由人类活动造成<sup>[42-43]</sup>,说明颗粒附着微生物的浓度可能受人类活动影响较大。



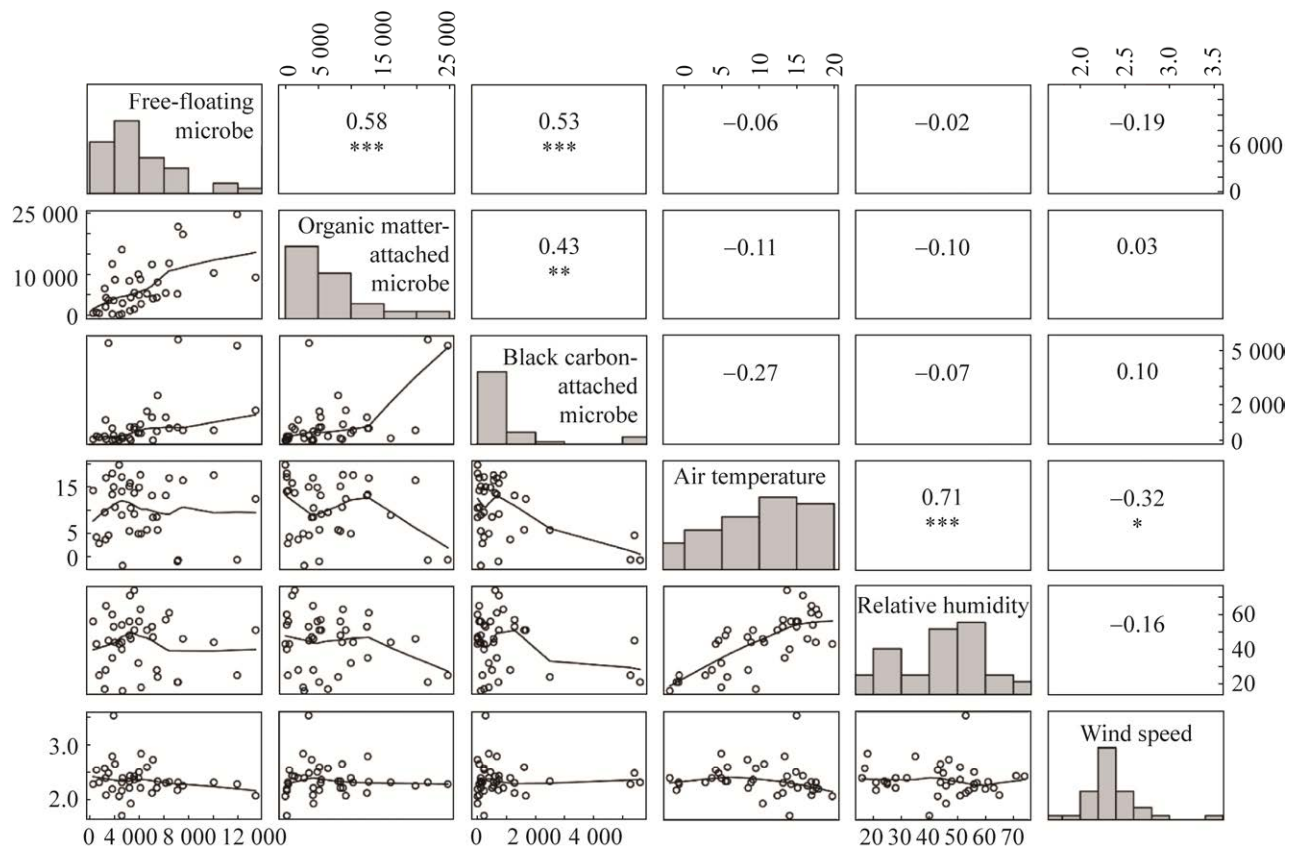


图5 微生物浓度与气象因素的关系

Figure 5 Relationship between meteorological factors and concentration of microbes. \*, \*\* and \*\*\* indicate  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$ , respectively.

### 3 讨论

#### 3.1 拉萨市空气微生物浓度水平分析

拉萨市整体空气质量较好, 全年  $\text{PM}_{2.5}$  浓度  $< 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 空气质量为优, 空气微生物浓度较低, 采样期间浓度分布在  $3.1 \times 10^3 - 2.38 \times 10^4 \text{ cells}/\text{m}^3$ , 远低于西安<sup>[44]</sup>、青岛<sup>[33-45]</sup>等其他城市, 在已有研究中处于较低水平(表 2)。

从多方面考虑其浓度水平较低的原因, 首先是来源方面, 拉萨市整体的空气微生物来源与其他城市相比较少, 植被覆盖率不高<sup>[48]</sup>, 其自然来源的空气微生物浓度较低, 拉萨市人口密度较低, 工业生产活动规模比西安、北京等地区小, 人员流动也没有这些地区密集, 因此

人类活动来源的空气微生物也可能相对较低。

从微生物的沉降方面来看, 拉萨市全年平均相对湿度为 44.86%; 平均风速为 2.3 m/s, 全年降水集中于夏季, 风速在 9-10 月之间有较大波动, 也会对其沉降造成影响, 但由于其来源本就相对较少, 因此, 空气微生物沉降对整体的影响不大, 从空气微生物浓度的季节变化无显著性差异也可以得到相同的结果。

#### 3.2 空气微生物浓度的季节分布差异

本研究的结果表明, 拉萨市 2019 年 10 月-2020 年 10 月期间, 空气微生物的浓度在冬季最高, 且随着季节更替浓度逐渐降低, 但四季无显著性差异。李婉欣<sup>[44]</sup>、Xie 等<sup>[31]</sup>发现西安市空气微生物浓度呈现冬春秋夏的高低分布,



图 6 微生物浓度与人类活动的关系

Figure 6 Relationship between human activity and concentration of microbes. \*, \*\* and \*\*\* indicate  $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$  and  $P < 0.001$ , respectively.

且除春季和秋季以外, 其他季节都存在显著性差异; Dong 等<sup>[49]</sup>在青岛地区的总微生物气溶胶研究中也发现了与西安市一致的季节分布规律; 程柏榕<sup>[50]</sup>也发现天津市冬季生物气溶胶浓度高于夏季。

有研究表明, 空气微生物浓度在冬季较高可能是风速小、PM 值高、多雾和雾霾天气等引起<sup>[49]</sup>, 春秋季节空气微生物浓度较高可能为春季植物开花和秋季叶落分解造成<sup>[51]</sup>; 夏季频繁的降雨事件的净化和强紫外线辐射的破坏使得环

境不适合微生物的生存和繁殖<sup>[52]</sup>, 空气微生物总浓度在夏季最低。结合本研究的采样地点来看, 春季的空气微生物可能来源于植物开花等事件; 夏季强紫外线辐射不利于空气微生物生存, 浓度降低; 秋季气象条件良好, 有助于扩散, 使得微生物浓度降低; 冬季存在供暖, 人类活动来源的颗粒物产生变多, 有利于微生物附着与生存, 浓度升高。然而本研究也发现, 空气微生物浓度在季节间无显著性差异, 说明这些因素并不会显著影响空气微生物浓度, 前

表 2 我国不同地区空气微生物浓度统计

Table 2 List of air microbial concentrations in different regions in China

地区 Region	采样时间 Sampling time	采样方法 Sampling method	样本量 Number of samples	检测指标 Detection indicator	浓度 Concentration	数据来源 Data sources
西安市 Xi'an	2019.9–2020.1	ZR-3930	Ground: 17; Middle layer: 15; Top layer: 17;	总微生物 Total airborne microbes	Ground: $1.10 \pm 0.58 \times 10^5$ cells/m <sup>3</sup> [23] Middle layer: $1.00 \pm 0.52 \times 10^5$ cells/m <sup>3</sup> Top layer: $0.82 \pm 0.25 \times 10^5$ cells/m <sup>3</sup>	
西安市 Xi'an	2016.9–2017.10	frmOmni	Hazy days: 25; Non-hazy day: 43	总微生物 Total airborne microbes	Hazy days: $1.71 \times 10^5$ cells/m <sup>3</sup> [31] Non-hazy day: $8.06 \times 10^4$ cells/m <sup>3</sup>	
青岛市 Qingdao	2013.10–2014.8	Anderson-6		总微生物 Total airborne microbes	$8.49 \times 10^4 - 2.11 \times 10^6$ cells/m <sup>3</sup> [33]	
合肥市 Hefei	2005.5.13–15	自然沉降法 Fallen plate method	10	可培养空气 微生物 Culturable airborne microbes	$5.42 \times 10^4$ CFU/m <sup>3</sup> [46]	
北京市 Beijing	2015.10–2016.1	GTTP4700	53	总微生物 Total airborne microbes	$1.69 \times 10^5 - 4.19 \times 10^6$ cells/m <sup>3</sup> [30]	
新乡市 Xinxiang	2019.12–2020.1	LY-2030A	54	总微生物 Total airborne microbes	TSP: $1.65 \times 10^4 - 3.85 \times 10^5$ cells/m <sup>3</sup> [34] PM <sub>2.5</sub> : $4.74 \times 10^3 - 2.75 \times 10^5$ cells/m <sup>3</sup>	
西安市 Xi'an	2014.8–2015.12	Anderson-6		可培养空气 微生物 Culturable airborne microbes	Hazy days: $3.70 \times 10^5$ CFU/m <sup>3</sup> [32] Non-hazy day: $3.72 \times 10^5$ CFU/m <sup>3</sup>	
拉萨市 Lhasa	2019.10–2020.10	ASONE, MAS-1	39	总微生物 Total airborne microbes	$3.10 \times 10^3 - 2.38 \times 10^4$ cells/m <sup>3</sup> This study	
	2016, winter	自然沉降法 Fallen plate method		可培养空气 微生物 Culturable airborne microbes	Bacteria: 160 CFU/m <sup>3</sup> [37] Fungi: 190 CFU/m <sup>3</sup>	
日喀则 Shigatse	2001.5	自然沉降法 Fallen plate method	7	可培养空气 微生物 Culturable airborne microbes	$1.21 \times 10^4$ CFU/m <sup>3</sup> [47]	

文中微生物浓度与气象因素相关性的结果也印证了这个说法。

### 3.3 微生物浓度的影响因素

气温和相对湿度是影响微生物浓度的重要因素, Li 等<sup>[33]</sup>研究青岛沿海地区空气微生物浓度特征后发现, 在一定温度范围内, 温度与空气中微生物的浓度有很强的相关性, 在相对温暖的气候中浓度较高, 在凉爽的气候中浓度较低; Jo 等<sup>[18]</sup>的研究表明相对湿度对空气中微生物的存活能力影响最大。有研究表明, 温度与相对湿度对于空气中微生物的浓度具有相关联的影响。Kethley 等<sup>[53]</sup>的研究指出, 在温度足够大时, 增加相对湿度会大大提高空气微生物的存活率; 胡庆轩等<sup>[19]</sup>研究得出, 大风能使空气中细菌粒子浓度增加, 且与风速有强烈的正相关关系。

在本研究中, 微生物浓度与气温、相对湿度、风速等都无显著相关, 但采样期间夏季的气温较高且有较强辐射, 不利于微生物生长, 相对应的 7、8 月微生物浓度较低, 而在 9、10 月风速增大, 使得微生物扩散到其他地方, 浓度也有明显降低。

很多研究<sup>[31,49,54]</sup>都表明, 对于雾霾天空气微生物的浓度要显著高于非雾霾天, 本研究发现总微生物浓度与其周边的颗粒物浓度有显著相关, 结合显微镜观察发现, 有较多的微生物附着于颗粒物上, 这可能提高了微生物在极端环境下的存活能力, 且附着于有机物上的微生物远多于附着于黑碳, 可能是有机物为微生物的生存提供了营养物质, 而黑碳只能为微生物提供附着条件, 甚至有可能含有其他有害物质, 使得附着在上面的微生物浓度水平较低。

## 4 结论

拉萨空气微生物主要的存在形式为附着在

颗粒物上和自由飘浮在空气中。拉萨空气微生物浓度变化范围为  $3.10 \times 10^3 - 2.38 \times 10^4$  cells/m<sup>3</sup>, 与其他城市相比处于较低水平, 自由漂浮微生物的浓度在冬季最高, 且与浓度最低的秋季存在显著性差异, 附着于颗粒物上微生物的浓度在冬季最高, 四季无显著性差异。微生物浓度与气温、相对湿度、风速无显著相关, 颗粒附着微生物与有机物、黑碳、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 显著相关, 可能是颗粒物为微生物的生存提供了有利条件。拉萨市空气微生物的浓度季节分布可能与气象因素无较大关系, 而与当地人类活动强弱息息相关, 研究结果能为检测空气质量和预防疾病传播提供相关依据。

## REFERENCES

- [1] 祁建华, 高会旺. 生物气溶胶研究进展: 环境与气候效应[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 854-861.  
QI JH, GAO HW. Environment and climate effect of bioaerosol: a review[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(4): 854-861 (in Chinese).
- [2] ZHANG DZ, MURATA K, HU W, YUAN HL, LI WL, MATSUSAKI H, KAKIKAWA M. Concentration and viability of bacterial aerosols associated with weather in Asian continental outflow: current understanding[J]. Aerosol Science and Engineering, 2017, 1(2): 66-77.
- [3] FRÖHLICH-NOWOISKY J, KAMPF CJ, WEBER B, HUFFMAN JA, PÖHLKER C, ANDREA MO, LANG-YONA N, BURROWS SM, GUNTHER SS, ELBERT W, SU H, HOOR P, THINES E, HOFFMANN T, DESPRÉS VR, PÖSCHL U. Bioaerosols in the earth system: climate, health, and ecosystem interactions[J]. Atmospheric Research, 2016, 182: 346-376.
- [4] FUKUSHIMA S, ZHANG DZ. Comparison in size and elemental composition of dust particles deposited to the surface and suspended in the air on the southwest Japan coast[J]. Atmospheric Environment, 2015, 118: 157-163.
- [5] SMETS W, MORETTI S, DENYS S, LEBEER S. Airborne bacteria in the atmosphere: presence, purpose, and potential[J]. Atmospheric Environment, 2016, 139: 214-221.
- [6] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 林学强, 王效科. 北京

- 市夏季空气微生物粒度分布特征[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 1-5.
- FANG ZG, OUYANG ZY, HU LF, LIN XQ, WANG XK. Granularity distribution of airborne microbes in summer in Beijing[J]. Environmental Science, 2004, 25(6): 1-5 (in Chinese).
- [7] 方治国, 欧阳志云, 胡利锋, 王效科, 林学强. 北京市夏季空气微生物群落结构和生态分布[J]. 生态学报, 2005, 25(1): 83-88.
- FANG ZG, OUYANG ZY, HU LF, WANG XK, LIN XQ. Community structure and ecological distribution of airborne microbes in summer in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 83-88 (in Chinese).
- [8] 夏晓敏, 汪建君, 陈立奇, 张锐. 厦门市10月份大气气溶胶中细菌群落结构的初步研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2010, 49(5): 682-687.
- XIA XM, WANG JJ, CHEN LQ, ZHANG R. Preliminary study of airborne bacteria community structure of aerosols of Xiamen in October[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2010, 49(5): 682-687 (in Chinese).
- [9] TANG K, HUANG ZW, HUANG JP, MAKI T, ZHANG S, SHIMIZU A, MA XJ, SHI JS, BI JR, ZHOU T, WANG GY, ZHANG L. Characterization of atmospheric bioaerosols along the transport pathway of Asian dust during the Dust-Bioaerosol 2016 Campaign[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(10): 7131-7148.
- [10] ABDEL HAMEED AA, KHODER MI, YUOSRA S, OSMAN AM, GHANEM S. Diurnal distribution of airborne bacteria and fungi in the atmosphere of Helwan area, Egypt[J]. The Science of the Total Environment, 2009, 407(24): 6217-6222.
- [11] 雒月云, 毛怡心, 庄思琪, 邓富昌, 侯敏, 唐宋, 姚孝元. 北京市不同季节室外细菌气溶胶分布特征及其环境影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 556-565.
- LUO YY, MAO YX, ZHUANG SQ, DENG FC, HOU M, TANG S, YAO XY. Seasonal distribution characteristics of bacterial aerosols and their correlations with environmental factors in Beijing, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 556-565 (in Chinese).
- [12] SARDA-ESTÈVE R, BAISSÉE D, GUINOT B, MAINELIS G, SODEAU J, O'CONNOR D, BESANCENOT JP, THIBAUDON M, MONTEIRO S, PETIT JE, GROS V. Atmospheric biodetection part I: study of airborne bacterial concentrations from January 2018 to may 2020 at saclay, France[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(17): 6292.
- [13] 王春华, 谢小保, 曾海燕, 欧阳友生, 郑芷青, 陈仪本. 深圳市空气微生物污染状况监测分析[J]. 微生物学杂志, 2008, 28(4): 93-97.
- WANG CH, XIE XB, ZENG HY, OUYANG YS, ZHENG ZQ, CHEN YB. Monitoring analysis of air microbial pollution conditions in Shenzhen city[J]. Journal of Microbiology, 2008, 28(4): 93-97 (in Chinese).
- [14] LI DW, LAMONDIA J. Airborne fungi associated with ornamental plant propagation in greenhouses[J]. Aerobiologia, 2010, 26(1): 15-28.
- [15] MOULI PC, MOHAN SV, REDDY SJ. Assessment of microbial (bacteria) concentrations of ambient air at semi-arid urban region: Influence of meteorological factors[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2005, 3(2): 139-149.
- [16] XU CH, WEI M, CHEN JM, ZHU C, LI JR, LÜ GL, XU XM, ZHENG LL, SUI GD, LI WJ, CHEN B, WANG WX, ZHANG QZ, DING AJ, MELLOUKI A. Fungi diversity in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> at the summit of Mt. Tai: abundance, size distribution, and seasonal variation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(18): 11247-11260.
- [17] FRÖHLICH-NOWOISKY J, BURROWS SM, XIE Z, ENGLING G, SOLOMON PA, FRASER MP, MAYOL-BRACERO OL, ARTAXO P, BEGEROW D, CONRAD R, ANDREA MO, DESPRÉS VR, PÖSCHL U. Biogeography in the air: fungal diversity over land and oceans[J]. Biogeosciences, 2012, 9(3): 1125-1136.
- [18] JO WK, KANG JH. Workplace exposure to bioaerosols in pet shops, pet clinics, and flower gardens[J]. Chemosphere, 2006, 65(10): 1755-1761.
- [19] 胡庆轩, 车凤翔, 陈振生, 徐桂清. 大风对大气细菌粒子浓度和粒度分布的影响[J]. 中国环境监测, 1991, 7(6): 5-8.
- HU QX, CHE FX, CHEN ZS, XU GQ. Influence of strong wind on the concentration and particle size distribution of atmospheric bacteria[J]. Environmental Monitoring in China, 1991, 7(6): 5-8 (in Chinese).
- [20] LIGHTHART B, KIRILENKO A. Simulation of summer-time diurnal bacterial dynamics in the atmospheric surface layer[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(14/15): 2491-2496.
- [21] TONG YY, LIGHTHART B. Solar radiation has a lethal effect on natural populations of culturable

- outdoor atmospheric bacteria[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(6): 897-900.
- [22] SALVAGGIO J, AUKRUST L. Mold-induced asthma[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 1981, 68(5): 327-346.
- [23] 慕飞飞. 西安市秋冬季微生物气溶胶的垂直分布特征研究[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2020.
- MU FF. Vertical distribution characteristics of bioaerosols during autumn and winter in Xi'an, China[D]. Xi'an: Master's Thesis of Changan University, 2020 (in Chinese).
- [24] XU ZQ, YAO MS. Monitoring of bioaerosol inhalation risks in different environments using a six-stage Andersen sampler and the PCR-DGGE method[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(5): 3993-4003.
- [25] SÁNCHEZ-MONEDERO MA, STENTIFORD EI. Generation and dispersion of airborne microorganisms from composting facilities[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2003, 81(3): 166-170.
- [26] WANG Z, REPONEN T, GRINSHUPUN SA, GÓRNY RL, WILLEKE K. Effect of sampling time and air humidity on the bioefficiency of filter samplers for bioaerosol collection[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(5): 661-674.
- [27] KILDESØ J, NIELSEN BH. Exposure assessment of airborne microorganisms by fluorescence microscopy and image processing[J]. *The Annals of Occupational Hygiene*, 1997, 41(2): 201-216.
- [28] ZENG QY, WESTERMARK SO, RASMUSON-LESTANDER Å, WANG XR. Detection and quantification of *Cladosporium* in aerosols by real-time PCR[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2006, 8(1): 153-160.
- [29] DAY JP, KELL DB, GRIFFITH GW. Differentiation of *Phytophthora infestans* sporangia from other airborne biological particles by flow cytometry[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(1): 37-45.
- [30] LI WL, YANG JS, ZHANG DZ, LI BZ, WANG ET, YUAN HL. Concentration and community of airborne bacteria in response to cyclical haze events during the fall and midwinter in Beijing, China[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1741.
- [31] XIE ZS, LI YP, LU R, LI WX, FAN CL, LIU PX, WANG JL, WANG WK. Characteristics of total airborne microbes at various air quality levels[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, 116: 57-65.
- [32] 王伟, 付红蕾, 王廷路, 宋颖, 扶娟, 项麦祺, 李彦鹏. 西安市秋季灰霾天气微生物气溶胶的特性研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(1): 279-288.
- WANG W, FU HL, WANG TL, SONG Y, FU J, XIANG MQ, LI YP. Characteristics of microbial aerosols on haze days in Autumn in Xi'an, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(1): 279-288 (in Chinese).
- [33] LI MF, QI JH, ZHANG HD, HUANG S, LI L, GAO DM. Concentration and size distribution of bioaerosols in an outdoor environment in the Qingdao coastal region[J]. *The Science of the Total Environment*, 2011, 409(19): 3812-3819.
- [34] YAN X, QIU DZ, ZHENG SK, YANG J, SUN HY, WEI Y, HAN JR, SUN JH, SU XF. Distribution characteristics and noncarcinogenic risk assessment of culturable airborne bacteria and fungi during winter in Xinxiang, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(36): 36698-36709.
- [35] 吴浩. 青藏高原及周边地区沙尘气溶胶时空分布及传输特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学硕士学位论文, 2020.
- WU H. Distribution and transport characteristics of dust aerosol over Tibetan Plateau and surrounding areas[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Information Science & Technology, 2020 (in Chinese).
- [36] 许瑞广. 气溶胶传输对青藏高原影响的大气数值模拟分析: 以南亚生物质燃烧产生的黑碳为例[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所)博士学位论文, 2017.
- XU RG. Influence of aerosols transport on Tibetan Plateau: WRF-chem cases study of black carbon(BC) emitted from biomass burning in south Asia[D]. Xi'an: Doctoral Dissertation of Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2017 (in Chinese).
- [37] 郭小芳, 潘成梅, 张俊勋, 次旦, 胡志伟. 拉萨市城关区冬季室外空气微生物的分离与鉴定[J]. *高原科学研究*, 2019, 3(1): 1-12.
- GUO XF, PAN CM, ZHANG JX, CIDAN, HU ZW. Investigation of airborne microbe during the winter in Chengguan District in Lhasa[J]. *Plateau Science Research*, 2019, 3(1): 1-12 (in Chinese).
- [38] 德吉, 张俊勋, 潘成梅, 次旦, 胡志伟. 秋季拉萨市城关区室外空气微生物多样性分析[J]. *高原科学研究*, 2019, 3(1): 13-20.
- DEJI, ZHANG JX, PAN CM, CIDAN, HU ZW. Analysis on microbial diversity in outdoor air during the autumn in Chengguan district, Lhasa[J]. *Plateau Science Research*, 2019, 3(1): 13-20 (in Chinese).

- [39] SHARMA GHIMIRE P, KANG SC, SAJJAD W, ALI B, TRIPATHEE L, CHEN PF. Microbial community composition analysis in spring aerosols at urban and remote sites over the Tibetan Plateau[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(5): 527.
- [40] PATEL A, NOBLE RT, STEELE JA, SCHWALBACH MS, HEWSON I, FUHRMAN JA. Virus and prokaryote enumeration from planktonic aquatic environments by epifluorescence microscopy with SYBR Green I[J]. *Nature protocols*, 2007, 2(2): 269-276.
- [41] MAKI T, KAKIKAWA M, KOBAYASHI F, YAMADA M, MATSUKI A, HASEGAWA H, IWASAKA Y. Assessment of composition and origin of airborne bacteria in the free troposphere over Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 74: 73-82.
- [42] 张丹, 楚宝临, 赵丽, 夏鹏超, 姚雅伟, 王秀琴, 谢耕, 赵矿. 拉萨市大气颗粒物碳组分污染特征及来源分析[J]. *环境影响评价*, 2018, 40(3): 65-70.
- ZHANG D, CHU BL, ZHAO L, XIA PC, YAO YW, WANG XQ, XIE G, ZHAO K. Characteristics and source of carbonaceous species in PM of Lhasa city[J]. *Environmental Impact Assessment*, 2018, 40(3): 65-70 (in Chinese).
- [43] WAN X, KANG SC, XIN JY, LIU B, WEN TX, WANG PL, WANG YS, CONG ZY. Chemical composition of size-segregated aerosols in Lhasa city, Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2016, 174/175: 142-150.
- [44] 李婉欣. 西安市大气细颗粒物中微生物浓度及细菌群落结构研究[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文, 2018.
- LI WX. Bioaerosol concentration and bacterial community structure in atmospheric fine particulate matters in Xi'an[D]. Xi'an: Master's Thesis of Chang'an University, 2018 (in Chinese).
- [45] 刘苗苗. 青岛近海秋冬季生物气溶胶分布特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文, 2008.
- LIU MM. Study on distribution of bioaerosol in fall and winter in Qingdao coastal region[D]. Qingdao: Master's Thesis of Ocean University of China, 2008 (in Chinese).
- [46] 凌琪, 王莉, 舒莹, 黄健, 张虎. 合肥城区空气微生物污染特征研究[C]. 中国环境科学学会 2006 年学术年会优秀论文集(下卷). 苏州, 2006: 114-118.
- LING Q, WANG L, SHU Y, HUANG J, ZHANG H. Characteristics of airborne microbial pollution in the urban of Hefei city[C]. Selected Papers of 2006 Annual Academic Conference of Chinese Society of Environmental Sciences (Part Three). Suzhou, 2006: 114-118 (in Chinese).
- [47] 陈皓文. 拉萨、日喀则空气微生物含量状况[J]. *青海环境*, 2003, 13(3): 97-99.
- CHEN HW. Air microbial content in Lhasa and Shigatse[J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2003, 13(3): 97-99 (in Chinese).
- [48] 张志伟, 尹惠妍, 薛杰, 余波, 韩嘉华, 姜有为. 基于 GIS 技术的拉萨市城关区荒漠分类研究[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 369-375.
- ZHANG ZW, YIN HY, XUE J, YU B, HAN JH, JANG YW. Desert classification of cengguan district of Lhasa city based on GIS technology[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6): 369-375 (in Chinese).
- [49] DONG LJ, QI JH, SHAO CC, ZHONG X, GAO DM, CAO WW, GAO JW, BAI R, LONG GY, CHU CC. Concentration and size distribution of total airborne microbes in hazy and foggy weather[J]. *The Science of the Total Environment*, 2016, 541: 1011-1018.
- [50] 程柏榕. 天津市夏、冬季荧光生物气溶胶特征分析[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2020.
- CHENG BR. Characterization of fluorescent bioaerosols in Tianjin during summer and winter[D]. Tianjin: Master's Thesis of Tianjin University, 2020 (in Chinese).
- [51] RAINA S, ODELL M, KESHAVARZ T. Quorum sensing as a method for improving sclerotiorin production in *Penicillium sclerotiorum*[J]. *Journal of Biotechnology*, 2010, 148(2/3): 91-98.
- [52] ULEVICIUS V, PECIULYTE D, LUGAUSKAS A, ANDRIEJAUSKIENE J. Field study on changes in viability of airborne fungal propagules exposed to UV radiation[J]. *Environmental Toxicology*, 2004, 19(4): 437-441.
- [53] KETHLEY TW, FINCHER EL, COWN WB. The effect of sampling method upon the apparent response of airborne bacteria to temperature and relative humidity[J]. *The Journal of Infectious Diseases*, 1957, 100(1): 97-102.
- [54] BAI WY, LI YP, XIE WW, MA TF, HOU JL, ZENG XL. Vertical variations in the concentration and community structure of airborne microbes in PM<sub>2.5</sub>[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143396.